

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-337236

(43)Date of publication of application : 07.12.2001

(51)Int.Cl.

G02B 6/12

(21)Application number : 2000-159811

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP  
<NTT>

(22)Date of filing : 30.05.2000

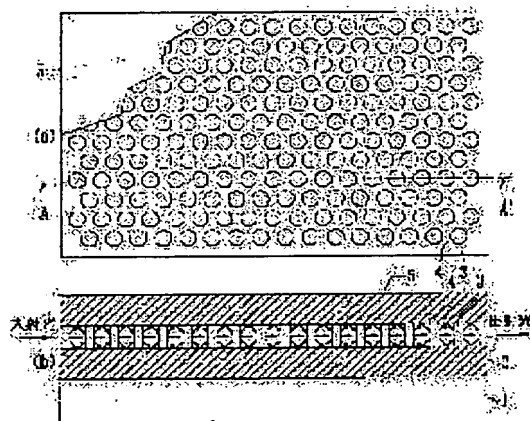
(72)Inventor : YOKOHAMA ITARU  
NOTOMI MASAYA  
ARAYA AKIHIKO  
TAMAMURA TOSHIAKI  
TOMARU AKIRA  
TAKAHASHI CHIHARU  
SUGITA AKIO

## (54) PHOTONIC CRYSTAL

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To solve such problems that propagation loss in the light propagating a conventional two-dimensional photonic crystal or in the light propagating a defective part of a conventional two-dimensional photonic crystal is high.

SOLUTION: The photonic crystal has a substrate 1, lower clad layer 2, light guide layer (3, 4) and upper clad layer 5. The light guide layer (3, 4) consists of a plurality of columnar parts (4) having a refractive index  $n_1$  arranged in the direction perpendicular to the substrate 1 and in a specified period between the lower clad layer 2 and the upper clad layer 5, and a part (3) having a refractive index  $n_2$  ( $n_1 \neq n_2$ ) possessing the space between the lower clad layer 2 and the upper clad layer 5 except the columnar part (4). The refractive index of the lower clad layer 2 is lower than both of the refractive indices  $n_1$  and  $n_2$ , and the refractive index of the upper clad layer 5 is lower than both of the refractive indices  $n_1$  and  $n_2$ .



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

19.12.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2001-337236  
(P2001-337236A)

(43) 公開日 平成13年12月7日 (2001.12.7)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テームト (参考)

G 0 2 B 6/12

G 0 2 B 6/12

Z 2 H 0 4 7

N

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2000-159811(P2000-159811)

(22) 出願日 平成12年5月30日 (2000.5.30)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 横浜 至

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 納富 雅也

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100064621

弁理士 山川 政樹

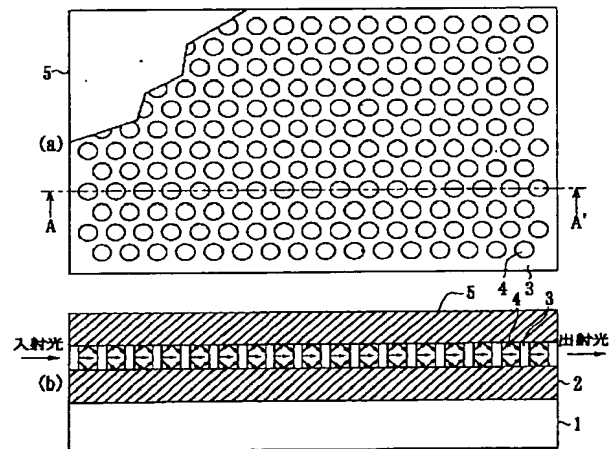
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶

## (57) 【要約】

【課題】 従来の2次元フォトニック結晶中を伝搬する光、ならびに従来の2次元フォトニック結晶中の欠陥部分を伝搬する光の伝搬損失が大きいという問題を解決する。

【解決手段】 基板1と、下部クラッド層2と、光を導波する層(3, 4)と、上部クラッド層5とを備え、光を導波する層(3, 4)は、下部クラッド層2と上部クラッド層5との間に基板1と直交する向きでかつ所定の周期で配設された屈折率 $n_1$ の複数の柱状部分(4)と、下部クラッド層2と上部クラッド層5との間のうち柱状部分(4)以外を占める屈折率 $n_2$  ( $n_1 \neq n_2$ )の部分(3)とで構成され、下部クラッド層2は、その屈折率が $n_1$  および $n_2$  の何れよりも低く、上部クラッド層5は、その屈折率が $n_1$  および $n_2$  の何れよりも低いものである。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 基板と、この基板上に形成された下部クラッド層と、この下部クラッド層上に形成され光を導波する層と、この光を導波する層上に形成された上部クラッド層とを備え、

前記光を導波する層は、前記下部クラッド層と前記上部クラッド層との間に前記基板と直交する向きでかつ所定の周期で配設された屈折率  $n_1$  の複数の柱状部分と、前記下部クラッド層と前記上部クラッド層との間のうち前記柱状部分以外を占める屈折率  $n_2$  ( $n_1 \neq n_2$ ) の部分とで構成され、

前記下部クラッド層は、その屈折率が前記  $n_1$  および前記  $n_2$  の何れよりも低く、

前記上部クラッド層は、その屈折率が前記  $n_1$  および  $n_2$  の何れよりも低いことを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 2】 請求項 1 に記載のフォトニック結晶において、

前記上部クラッド層は、前記複数の柱状部分の直上領域と前記屈折率  $n_2$  の領域の直上領域とで屈折率が異なることを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 3】 請求項 1 または請求項 2 に記載のフォトニック結晶において、

前記下部クラッド層は、前記複数の柱状部分の直下領域と前記屈折率  $n_2$  の領域の直下領域とで屈折率が異なることを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 4】 請求項 1 乃至請求項 3 の何れか一項に記載のフォトニック結晶において、

前記光を導波する層は、柱状物または空孔が基板上に周期的に形成された構造を有するとともに、この構造の一部に周期性の欠陥部分を有することを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 5】 請求項 1 乃至請求項 4 の何れか一項に記載のフォトニック結晶において、

前記屈折率  $n_1$  の柱状部分または前記屈折率  $n_2$  の領域のうち、屈折率の低い何れか一つの領域は、エポキシ系ポリマーからなることを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 6】 請求項 1 乃至請求項 5 の何れか一項に記載のフォトニック結晶において、

前記上部クラッド層は、エポキシ系ポリマーからなることを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 7】 請求項 1 乃至請求項 6 の何れか一項に記載のフォトニック結晶において、

前記下部クラッド層は、前記屈折率  $n_1$  の柱状部分と前記屈折率  $n_2$  の領域のうち、屈折率の低い何れか一つの領域の直下の領域がエポキシ系ポリマーからなることを特徴とするフォトニック結晶。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、フォトニック結晶

に関し、特に光情報処理、光伝送等に用いられるレーザ、光導波路、光集積回路等の様々な光デバイス等を構成するためのフォトニック結晶に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】 誘電体周期構造中の光は周期的摂動を受け、周波数の分散関係が結晶中のバンド構造と同様なバンド構造をとることが知られており、このような誘電体周期構造はフォトニック結晶と呼ばれている。フォトニック結晶中の光の伝搬はバンド構造により決定されるため、結晶構造や周期的摂動の大きさを制御することにより、その光学的性質を設計することができる。フォトニック結晶の中で、柱状物あるいは空孔が基板上に周期的に形成される構造は、2次元周期構造をもつことから2次元フォトニック結晶と呼ばれる。ほとんどの光デバイスが2次元フォトニック結晶で実現できる可能性があること、作製工程が3次元フォトニック結晶に比べて比較的容易であることから、作製および検討がなされている。

【0003】 理想的な2次元フォトニック結晶は、厚さ無限大の構造であるが、現実的には有限厚さの構造を取り扱わなければならないため、周期方向に対して垂直な方向の光の閉じ込めが現実的には重要となる。垂直方向の光の閉じ込めを実現する方法として、柱状物あるいは空孔が周期的に形成されている構造を有する層を、柱状物あるいは空孔の残存部分を形成する媒質よりも低い屈折率を有する層で挟み込む構造（後述の従来の第一の構造）、または柱状物もしくは空孔の残存部分に、屈折率の高い材料を屈折率の低い材料で挟み込む構造を形成する構造（後述の従来の第二の構造）の主に2つが従来提案され、作製が行われている。

【0004】 従来の第一の構造のうち、空孔を形成する構造の上面図とそのH-H'線断面図を模式的に図9に示す。基板Si 91上に、SiO<sub>2</sub>層92が形成され、さらにその上に上部Si層93が形成されたSOI（Silicon-on-insulator）基板を用い、上部Si層93にドライエッチングにより、周期的に空孔94が形成されている。この構造では、2次元の周期構造を有する上部Si層93（屈折率約3.5）を、屈折率の低いSiO<sub>2</sub>層92（屈折率約1.5）と空気層（屈折率1.0）とで挟み込んでおり、垂直方向の光の閉じ込めを図っている。

【0005】 この例では、上部Si層93の厚さが0.2μm、SiO<sub>2</sub>層92の厚さが3.0μm、また空孔94の直径が0.3μm、3角格子を形成している空孔94の周期が0.4μmとなっている。この試料では、波長1.5μmの電界の振動方向が基板91面に垂直である垂直偏光は、2次元の周期構造を有する上部Si層93を透過し、電界の振動方向が基板91面に水平である水平偏光は、フォトニックバンドギャップのため2次元の周期構造を有する上部Si層93を透過しな

い。垂直偏光に対する透過損失を測定したところ 30 dB/mm となり、比較的大きな損失値となっており、ミリメートル (mm) オーダーでの光の伝搬を行うことが難しいものである。

【0006】従来の第一の構造のうち、柱状物を形成する構造の上面図とその I-I' 線断面図を模式的に図 10 に示す。基板 Si101 上に、SiO<sub>2</sub> 層 102 が形成され、さらにその上に上部 Si 層が形成された SOI 基板を用い、上部 Si 層にドライエッチングにより、周期的に円柱 103 が形成されている。この構造では、2 次元の周期構造を有する円柱 103 (屈折率約 3.5) を、屈折率の低い SiO<sub>2</sub> 層 102 (屈折率約 1.5) と空気層 (屈折率 1.0) とで挟み込んでおり、垂直方向の光の閉じ込めを図っている。

【0007】この例では、円柱 103 の厚さが 0.2 μm、SiO<sub>2</sub> 層 102 の厚さが 3.0 μm、また円柱 103 の直径が 0.16 μm、3 角格子を形成している円柱 103 の周期が 0.4 μm となっている。この試料では、波長 1.5 μm の電界の振動方向が基板 101 面内に垂直である垂直偏光は、2 次元の周期構造を有する円柱 103 を透過し、電界の振動方向が基板 101 面内に水平である水平偏光は、フォトリックバンドギャップのため 2 次元の周期構造を有する円柱 103 を透過しない。しかし、垂直偏光に対する透過損失を測定したところ 40 dB/mm となり、比較的大きな損失値となっており、mm オーダーでの光の伝搬を行うことが難しいものである。

【0008】従来の第二の構造のうち、空孔を形成する構造の上面図とその J-J' 線断面図を模式的に図 11 に示す。下部 AlGaAs 層上に GaAs 層 (厚さ 0.2 μm) が形成され、さらにその上に上部 AlGaAs 層 (厚さ 0.4 μm) が形成された基板に、ドライエッチングにより、周期的に空孔 111 (深さ 1.0 μm) が形成されている。この構造では、2 次元の周期構造を有する GaAs 層 112 (屈折率約 3.5) を、屈折率が低く同じく 2 次元の周期構造を有する上部 AlGaAs 層 113 (屈折率約 3.0) と屈折率が低く一部が 2 次元周期構造を有する下部 AlGaAs 層 114 (屈折率約 3.0) とで挟み込んでおり、垂直方向の光の閉じ込めを図っている。

【0009】この例では、空孔 111 の直径が 0.3 μm、3 角格子を形成している空孔 111 の周期が 0.4 μm となっている。この試料では、波長 1.5 μm の電界の振動方向が GaAs 層 112 の面内に垂直である垂直偏光は、2 次元の周期構造を有する GaAs 層 112 を透過し、電界の振動方向が GaAs 層 112 の面内に水平である水平偏光は、フォトリックバンドギャップのため 2 次元の周期構造を有する GaAs 層 112 を透過しない。しかし、垂直偏光に対する透過損失を測定したところ 30 dB/mm となり、比較的大きな損失値とな

っており、mm オーダーでの光の伝搬を行うことが難しいものである。

【0010】また、従来構造を使って、2 次元周期構造の一部に欠陥を導入し、その欠陥部分に光を導波させることも検討されている。従来の第一の構造のうち、空孔を形成する構造に直線の欠陥部分を導入した構造の上面図とその K-K' および L-L' 線断面図を模式的に図 12 に示す。基板 Si121 上に、SiO<sub>2</sub> 層 122 が形成され、さらにその上に上部 Si 層 123 が形成された SOI 基板を用い、上部 Si 層 123 にドライエッチングにより、周期的に空孔 124 が形成されている。この構造では、2 次元の周期構造を有する上部 Si 層 123 (屈折率約 3.5) を、屈折率の低い SiO<sub>2</sub> 層 122 (屈折率約 1.5) と空気層 (屈折率 1.0) とで挟み込んでおり、垂直方向の光の閉じ込めを図っている。この例では、上部 Si 層 123 の厚さが 0.2 μm、SiO<sub>2</sub> 層 122 の厚さが 3.0 μm、また空孔 124 の直径が 0.3 μm、3 角格子を形成している空孔 124 の周期が 0.4 μm となっている。

【0011】この試料では、前述したように波長 1.5 μm の電界の振動方向が基板 121 面内に垂直である垂直偏光は、2 次元の周期構造を有する上部 Si 層 123 を透過し、電界の振動方向が基板 121 面内に水平である水平偏光は、フォトリックバンドギャップのため 2 次元の周期構造を有する上部 Si 層 123 を透過しない。本試料では、周期構造の一部に空孔が 1 列抜けた直線状の欠陥導波路 125 が形成されている。欠陥導波路 125 に入射された水平偏光の波長 1.5 μm の光は、水平方向に関しては空孔 124 の周期構造がフォトリックバンドギャップとなっているため欠陥導波路 125 部分に閉じ込められ、垂直方向に関しては上下の屈折率差により欠陥導波路 125 部分に閉じ込められて、欠陥導波路 125 を伝搬する。しかし、水平偏光に対する欠陥導波路 125 の透過損失を測定したところ 20 dB/mm となり、比較的大きな損失値となっており、mm オーダーでの光の伝搬を行うことが難しく、光集積回路を作製することができなかった。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、従来の 2 次元フォトリック結晶の構成では、光伝搬媒体としての 2 次元フォトリック結晶の伝搬損失が大きく、フォトリック結晶の有する種々の特徴を活かしたデバイスへの応用が困難という問題点があった。

【0013】本発明は、このような課題を解決するためのものであり、従来の 2 次元フォトリック結晶中を伝搬する光、ならびに従来の 2 次元フォトリック結晶中の欠陥部分を伝搬する光の伝搬損失が大きいう問題を容易に解決することができるフォトリック結晶を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】上記問題点を解決するため、本願発明者らは従来構成の損失要因を検討した。その結果、従来は、周期構造が光の波長以下の微小構造であるため、各層の平均屈折率の差により光は垂直方向に十分閉じ込められると考えられていたが、主な損失要因は、従来構成を模式的に表した上述の図 9、図 10、図 11、図 12 の断面図中に模式的に矢印で示したように、空孔部あるいは柱状物以外の部分において、垂直方向の光の閉じ込め構造が微視的になされていないことに起因する上下方向への散乱損失にあることを見いだした。そして、問題点を解決する手段として、本発明の基本的な考え方は、従来垂直方向の光の閉じ込め構造が微視的になされていなかった空孔部あるいは柱状物以外の部分についても微視的に屈折率差による垂直方向閉じ込め構造を形成することにある。

【0015】このような目的を達成するために、本発明に係るフォトニック結晶は、基板と、この基板上に形成された下部クラッド層と、この下部クラッド層上に形成され光を導波する層と、この光を導波する層上に形成された上部クラッド層とを備え、前記光を導波する層は、前記下部クラッド層と前記上部クラッド層との間に前記基板と直交する向きでかつ所定の周期で配設された屈折率  $n_1$  の複数の柱状部分と、前記下部クラッド層と前記上部クラッド層との間のうち前記柱状部分以外を占める屈折率  $n_2$  ( $n_1 \neq n_2$ ) の部分とで構成され、前記下部クラッド層は、その屈折率が前記  $n_1$  および前記  $n_2$  の何れよりも低く、前記上部クラッド層は、その屈折率が前記  $n_1$  および  $n_2$  の何れよりも低いものである。

【0016】また、本発明はその他の態様として次に示す構成を含むものである。すなわち、前記上部クラッド層は、前記複数の柱状部分の直上領域と前記屈折率  $n_2$  の領域の直上領域とで屈折率が異なる。また、前記下部クラッド層は、前記複数の柱状部分の直下領域と前記屈折率  $n_2$  の領域の直下領域とで屈折率が異なる。また、前記光を導波する層は、柱状物または空孔が基板上に周期的に形成された構造を有するとともに、この構造の一部に周期性の欠陥部分を有する。

【0017】また、前記屈折率  $n_1$  の柱状部分または前記屈折率  $n_2$  の領域のうち、屈折率の低い何れか一つの領域は、エポキシ系ポリマーからなる。また、前記上部クラッド層は、エポキシ系ポリマーからなる。さらに、前記下部クラッド層は、前記屈折率  $n_1$  の柱状部分と前記屈折率  $n_2$  の領域のうち、屈折率の低い何れか一つの領域の直下の領域がエポキシ系ポリマーからなる。

【0018】このように構成することにより本発明は、2次元フォトニック結晶あるいは2次元フォトニック結晶欠陥導波路の伝搬損失が大きいという問題点を解決し、低損失2次元フォトニック結晶および低損失2次元フォトニック結晶欠陥導波路を実現することができ、種々のデバイスへの応用が可能となる。

【0019】

【発明の実施の形態】次に、本発明の実施の形態について図を用いて説明する。

【0020】〔第一の実施の形態〕本発明の第一の実施の形態の構造を模式的に図 1 に示す（上面図（上部クラッド層 5 の一部は除去）およびその A-A' 線断面図）。基板 1 上に下部クラッド層 2 が形成され、さらにその上に周期的に形成された空孔以外の部分 3 と周期的に形成された空孔を充填した部分 4 が形成され、さらにその上に上部クラッド層 5 が形成された構造となっている。この第一の実施の形態では、基板 1 は Si であり、下部クラッド層 2 は SiO<sub>2</sub> 層（屈折率約 1.5、厚さ 3 μm）であり、周期的に形成された空孔以外の部分 3 は Si（屈折率約 3.5、厚さ 0.2 μm）であり、周期的に形成された空孔を充填した部分 4 はエポキシ系ポリマー（屈折率 1.6、厚さ 0.2 μm）であり、上部クラッド層 5 はフッ素化エポキシ系ポリマー（屈折率 1.5、厚さ 3 μm）である。

【0021】また、空孔を充填した部分 4 の直径が 0.3 μm、3 角格子を形成し充填された周期的空孔の周期が 0.4 μm となっている。本構造においては、周期的に形成された空孔以外の部分 3 の Si が、周期的構造における屈折率の高い部分になっており、周期的に形成された空孔を充填した部分 4 のエポキシ系ポリマーが屈折率の低い部分となっている。その結果、周期的に変化する構造の屈折率の高い部分の屈折率を  $n_1$ 、屈折率の低い部分の屈折率を  $n_2$  とし、下部クラッド層の屈折率を  $n_3$ 、上部クラッド層の屈折率を  $n_4$  としたとき、 $n_2 < n_1$  かつ  $n_3 < n_1$  かつ  $n_4 < n_1$  であり、かつ、 $n_3 < n_2$  かつ  $n_4 < n_2$  の条件を満たしている。このため、図 1 の断面図に模式的に矢印で示したように、周期的構造の屈折率の低い部分の微視的構造においても屈折率差による垂直方向の光の閉じ込めがなされる構造となっている。

【0022】第一の実施の形態の作製工程を図 2 に示す。

(a) Si 層 21 上に SiO<sub>2</sub> 層 22 が形成され、さらにその上にトップ Si 層 23 が形成された SOI 基板上に、周期的構造を転写した Ni マスク 24 を蒸着する。

(b) ドライエッチングにより、Ni マスク 24 の蒸着されていないトップ Si 層 23 に垂直孔を開け、空孔の残存部分の Si 25 を形成する。

(c) Ni マスク 24 をエッチングにより除去する。

【0023】(d) SiO<sub>2</sub> 層 22 ならびに空孔の残存部分の Si 25 上に、エポキシ系ポリマーをスピンコーティングにより塗布し、その後硬化させ、空孔を埋め込んだエポキシ系ポリマー層 26 を形成する。

(e) ドライエッチングにより、空孔を埋め込んだエポキシ系ポリマー層 26 を空孔の残存部分の Si 25 の先端部分がほぼ露出するまでエッチングし、空孔を充填し

たエポキシ系ポリマー 27 を形成する。

(f) さらにその上に、フッ素化エポキシ系ポリマーをスピンコーティングにより塗布し、硬化させ、上部クラッド層となるフッ素化エポキシ系ポリマー層 28 を形成する。

【0024】この試料では、波長  $1.5\mu\text{m}$  の電界の振動方向が基板 1 面内に垂直である垂直偏光は、2次元の周期構造を有する空孔以外の部分 3 と空孔を充填した部分 4 を透過し、電界の振動方向が基板 1 面内に水平である水平偏光は、フォトリソバンドギャップのため 2次元の周期構造を有する空孔以外の部分 3 と空孔を充填した部分 4 を透過しない。垂直偏光に対する透過損失を測定したところ  $5\text{dB/mm}$  となり、従来構造に比べて、 $1\text{mm}$  あたりで  $20\text{dB}$  以上の極めて大きな損失改善が得られ、本発明の効果が極めて大きいことが示された。したがって、本実施の形態の試料は、 $\text{mm}$  オーダーでの光の伝搬を十分に行うことができる媒質といえる。また、本実施の形態では上部クラッド層および下部クラッド層に固体材料を用いたが、屈折率の条件を満たせば気体材料または液体材料であっても同様の効果を得ることができる。

【0025】〔第二の実施の形態〕本発明の第二の実施の形態を説明するが、構造は図 1 に示す第一の実施の形態と同一であり、一部材料が異なるものである。基板 1 上に下部クラッド層 2 が形成され、さらにその上に周期的に形成された空孔以外の部分 3 と周期的に形成された空孔を充填した部分 4 が形成され、さらにその上に上部クラッド層 5 が形成された構造となっている。第二の実施の形態では、基板 1 は Si であり、下部クラッド層 2 は  $\text{SiO}_2$  層（屈折率約 1.5、厚さ  $3\mu\text{m}$ ）であり、周期的に形成された空孔以外の部分 3 は Si（屈折率約 3.5、厚さ  $0.2\mu\text{m}$ ）であり、周期的に形成された空孔を充填した部分 4 は Ge 添加  $\text{SiO}_2$ （屈折率 1.56、厚さ  $0.2\mu\text{m}$ ）であり、上部クラッド層 5 は  $\text{SiO}_2$  層（屈折率 1.5、厚さ  $3\mu\text{m}$ ）である。

【0026】また、空孔を充填した部分 4 の直径が  $0.3\mu\text{m}$ 、3 角格子を形成し充填された周期的空孔の周期が  $0.4\mu\text{m}$  となっている。本構造においては、周期的に形成された空孔以外の部分 3 の Si が、周期的構造における屈折率の高い部分になっており、周期的に形成された空孔を充填した部分 4 の Ge 添加  $\text{SiO}_2$  が屈折率の低い部分となっている。その結果、周期的に変化する構造の屈折率の高い部分の屈折率を  $n_1$ 、屈折率の低い部分の屈折率を  $n_2$  とし、下部クラッド層の屈折率を  $n_3$ 、上部クラッド層の屈折率を  $n_4$  としたとき、 $n_2 < n_1$  かつ  $n_3 < n_1$  かつ  $n_4 < n_1$  であり、かつ  $n_3 < n_2$  かつ  $n_4 < n_2$  の条件を満たしている。このため、第一の実施の形態と同様に、図 1 の断面図に模式的に矢印で示したように、周期的構造の屈折率の低い部分の微視的構造においても屈折率差による垂直方向の光の閉じ込めがな

される構造となっている。

【0027】次に、第二の実施の形態の作製工程を図 3 に示す。

(a) Si 層 31 上に  $\text{SiO}_2$  層 32 が形成され、さらにその上にトップ Si 層 33 が形成された SOI 基板上に、周期的構造を転写した Ni マスク 34 を蒸着する。

(b) ドライエッチングにより、Ni マスク 34 の蒸着されていないトップ Si 層 33 に垂直孔を開け、空孔の残存部分の Si 35 を形成する。

10 (c) Ni マスク 34 をエッチングにより除去する。

【0028】(d)  $\text{SiO}_2$  層 32 ならびに空孔の残存部分の Si 35 上に、Ge 添加  $\text{SiO}_2$  をスパッタリングにより堆積し、空孔を埋め込んだ Ge 添加  $\text{SiO}_2$  層 36 を形成する。

(e) ドライエッチングにより、空孔を埋め込んだ Ge 添加  $\text{SiO}_2$  層 36 を空孔の残存部分の Si 35 の先端部分がほぼ露出するまでエッチングし、空孔を充填した Ge 添加  $\text{SiO}_2$  37 を形成する。

20 (f) さらにその上に、 $\text{SiO}_2$  をスパッタリングにより堆積し、上部クラッド層となる  $\text{SiO}_2$  層 38 を形成する。

【0029】この試料では、第一の実施の形態と同様に、波長  $1.5\mu\text{m}$  の電界の振動方向が基板 1 面内に垂直である垂直偏光は、2次元の周期構造を有する空孔以外の部分 3 と空孔を充填した部分 4 を透過し、電界の振動方向が基板 1 面内に水平である水平偏光は、フォトリソバンドギャップのため 2次元の周期構造を有する空孔以外の部分 3 と空孔を充填した部分 4 を透過しない。垂直偏光に対する透過損失を測定したところ  $6\text{dB/mm}$  となり、従来構造に比べて、 $1\text{mm}$  あたりで  $20\text{dB}$  以上の極めて大きな損失改善が得られ、第一の実施の形態と同様に本発明の効果が極めて大きいことが示された。本実施の形態の試料は、 $\text{mm}$  オーダーでの光の伝搬を十分に行うことができる媒質である。

【0030】〔第三の実施の形態〕本発明の第三の実施の形態の構造を模式的に図 4 に示す（上面図（上部クラッド層 45 の一部は除去）およびその B-B' 線断面図）。第三の実施の形態では周期的に柱状物を形成した構造となっている。基板 41 上に、下部クラッド層 42 が形成され、さらにその上に周期的に形成された円柱部分 43 と周期的に形成された円柱以外の部分を充填した部分 44 が形成され、さらにその上に上部クラッド層 45 が形成された構造となっている。第三の実施の形態では、基板 41 は Si であり、下部クラッド層 42 は  $\text{SiO}_2$  層（屈折率約 1.5、厚さ  $3\mu\text{m}$ ）であり、周期的に形成された円柱部分 43 は Si（屈折率約 3.5、厚さ  $0.2\mu\text{m}$ ）であり、周期的に形成された円柱以外の部分を充填した部分 44 はエポキシ系ポリマー（屈折率 1.6、厚さ  $0.2\mu\text{m}$ ）であり、上部クラッド層 45 はフッ素化エポキシ系ポリマー（屈折率 1.5、厚さ 3

$\mu\text{m}$ )である。また、円柱部分44の直径が $0.16\mu\text{m}$ 、3角格子を形成し周期的構造の円柱の周期が $0.4\mu\text{m}$ となっている。

【0031】本構造においては、周期的に形成された円柱部分43のSiが、周期的構造における屈折率の高い部分になっており、周期的に形成された円柱以外の部分を充填した部分44のエポキシ系ポリマーが屈折率の低い部分となっている。その結果、周期的に変化する構造の屈折率の高い部分の屈折率を $n_1$ 、屈折率の低い部分の屈折率を $n_2$ とし、下部クラッド層の屈折率を $n_3$ 、上部クラッド層の屈折率を $n_4$ としたとき、 $n_2 < n_1$ かつ $n_3 < n_4$ かつ $n_1 < n_3$ であり、かつ $n_2 < n_3$ かつ $n_4 < n_1$ の条件を満たしている。このため、図4の断面図に模式的に矢印で示したように、周期的構造の屈折率の低い部分の微視的構造においても屈折率差による垂直方向の光の閉じ込めがなされる構造となっている。

【0032】第三の実施の形態の作製工程は、第一の実施の形態と同一であり、Niマスクのパターンニングが異なるのみである。この試料では、波長 $1.5\mu\text{m}$ の電界の振動方向が基板41面内に垂直である垂直偏光は、2次元の周期構造を有する円柱部分43と円柱以外の部分を充填した部分44を透過し、電界の振動方向が基板41面内に水平である水平偏光は、フォトリソバンドギャップのため2次元の周期構造を有する円柱部分43と円柱以外の部分を充填した部分44を透過しない。垂直偏光に対する透過損失を測定したところ $7\text{dB/mm}$ となり、従来構造に比べて、 $1\text{mm}$ あたりで $20\text{dB}$ 以上の極めて大きな損失改善が得られ、本発明の効果が極めて大きいことが示された。本実施の形態の試料は、 $\text{mm}$ オーダーでの光の伝搬を十分に行うことができる媒質である。

【0033】〔第四の実施の形態〕本発明の第四の実施の形態の構造を模式的に図5に示す。基板51上に空孔が周期的に形成され、空孔の残りの部分が、第一のコア層52と第一の上部クラッド層53と第一の下部クラッド層54からなり、第一のコア層52が第一の上部クラッド層53と第一の下部クラッド層54に挟まれる構造であって、空孔部分が、第二のコア層55と第二の上部クラッド層56と第二の下部クラッド層57からなり、第二のコア層55が第二の上部クラッド層56と第二の下部クラッド層57に挟まれる構造により充填されており、第一のコア層52と第二のコア層55がほぼ同一の平面内に存在している構造となっている。

【0034】この第四の実施の形態では、基板51はAlGaAsであり、第一の上部クラッド層53はAlGaAs（屈折率3.0、厚さ $0.4\mu\text{m}$ ）および第一の下部クラッド層54はAlGaAs（屈折率3.0、厚さ $0.4\mu\text{m}$ ）であり、第一のコア層52はGaAs（屈折率3.5、厚さ $0.2\mu\text{m}$ ）である。また、第二のコア層55はエポキシ系ポリマー（屈折率1.6、厚さ

$0.2\mu\text{m}$ )であり、第二の上部クラッド層56はフッ素化エポキシ系ポリマー（屈折率1.5、厚さ $0.4\mu\text{m}$ ）であり、第二の下部クラッド層57はフッ素化エポキシ系ポリマー（屈折率1.5、厚さ $0.4\mu\text{m}$ ）である。

【0035】その結果、第一のコア層の屈折率を $n_1$ 、第一の上部クラッド層の屈折率を $n_2$ 、第一の下部クラッド層の屈折率を $n_3$ 、第二のコア層の屈折率を $n_4$ 、第二の上部クラッド層の屈折率を $n_5$ 、第二の下部クラッド層の屈折率を $n_6$ 、としたとき、 $n_4 < n_1$ かつ $n_3 < n_2$ かつ $n_6 < n_5$ であり、かつ $n_2 < n_1$ かつ $n_3 < n_4$ かつ $n_6 < n_5$ の条件を満たしている。このため、図5の断面図に模式的に矢印で示したように、周期的構造の屈折率の低い部分の微視的構造においても屈折率差による垂直方向の光の閉じ込めがなされる構造となっている。

【0036】第四の実施の形態の作製工程を図6に示す。

(a) AlGaAs層61上にGaAs層62が形成され、さらにその上にトップAlGaAs層63が形成された基板上に、周期的構造を転写したNiマスク64を蒸着する。

(b) ドライエッチングにより、Niマスク64の蒸着されていないトップAlGaAs層63およびGaAs層62を貫通してAlGaAs層61の一部までに垂直孔を開け、空孔の残存部分を形成する。これにより、第一のコア層65、第一の上部クラッド層66、第一の下部クラッド層67が形成される。

(c) Niマスク64をエッチングにより除去する。

【0037】(d) 空孔を形成したAlGaAs層ならびに空孔の残存部分上に、第一の下部クラッド層の厚さである $0.4\mu\text{m}$ 厚だけスパッタリングによりSiO<sub>2</sub>を堆積し、第二の下部クラッド層68を形成する。この程度の厚さの堆積では空孔は埋め込まれることなく堆積できる。

(e) さらに、第一のコア層の厚さである $0.2\mu\text{m}$ 厚だけスパッタリングによりGe添加SiO<sub>2</sub>を堆積し、第二のコア層69を形成する。

(f) さらに、第一の上部クラッド層の厚さである $0.4\mu\text{m}$ 厚だけスパッタリングによりSiO<sub>2</sub>を堆積し、第二の上部クラッド層610を形成する。

(g) 空孔の残存部分上の堆積物をエッチングにより除去する。

【0038】この試料では、波長 $1.5\mu\text{m}$ の電界の振動方向が基板51面内に垂直である垂直偏光は、第一のコア層52と第二のコア層55を透過し、電界の振動方向が基板51面内に水平である水平偏光は、フォトリソバンドギャップのため第一のコア層52と第二のコア層55を透過しない。垂直偏光に対する透過損失を測定したところ $5\text{dB/mm}$ となり、従来構造に比べて、1



mmあたりで20dB以上の極めて大きな損失改善が得られ、本発明の効果が極めて大きいことが示された。本実施の形態の試料は、mmオーダーでの光の伝搬を十分に行うことができる媒質である。

【0039】本実施の形態では、周期的構造の屈折率の高い部分が空孔の残存部分であったが、屈折率の高い部分が柱状物（例えば円柱）であっても同様に損失低減がなされることはもちろんである。

【0040】[第五の実施の形態] 次に、2次元周期構造の一部に欠陥を導入し、その欠陥部分に光を導波させる場合の実施の形態について説明する。本発明の第五の実施の形態の構造を模式的に図7に示す（上面図（上部クラッド層75の一部は除去）およびそのD-D'、E-E'線断面図）。第五の実施の形態は、第一の実施の形態の周期的構造の一部に直線状の欠陥を設け、空孔が1列抜けた構成となっており欠陥導波路76を形成している。基板71上に下部クラッド層72が形成され、さらにその上に周期的に形成された空孔以外の部分73と周期的に形成された空孔を充填した部分74が形成され、さらにその上に上部クラッド層75が形成された構造となっており、さらに上面図に示すように直線状の欠陥導波路76が形成されている。

【0041】この第五の実施の形態では、第一の実施の形態と同様、基板71はSiであり、下部クラッド層72はSiO<sub>2</sub>層（屈折率約1.5、厚さ3μm）であり、周期的に形成された空孔以外の部分73はSi（屈折率約3.5、厚さ0.2μm）であり、周期的に形成された空孔を充填した部分74はエポキシ系ポリマー（屈折率1.6、厚さ0.2μm）であり、上部クラッド層75はフッ素化エポキシ系ポリマー（屈折率1.5、厚さ3μm）である。また、欠陥導波路76は周期的に形成された空孔以外の部分73と同じSiである。また、空孔を充填した部分74の直径が0.3μm、3角格子を形成し充填された周期的空孔の周期が0.4μmとなっている。

【0042】本構造においては、周期的に形成された空孔以外の部分73のSiが、周期的構造における屈折率の高い部分になっており、周期的に形成された空孔を充填した部分74のエポキシ系ポリマーが屈折率の低い部分となっている。その結果、周期的に変化する構造の屈折率の高い部分の屈折率を $n_1$ 、屈折率の低い部分の屈折率を $n_2$ とし、下部クラッドの屈折率を $n_3$ 、上部クラッド層の屈折率を $n_4$ としたとき、 $n_2 < n_1$ かつ $n_3 < n_1$ かつ $n_4 < n_1$ であり、かつ $n_3 < n_2$ かつ $n_4 < n_2$ の条件を満たしている。このため、図7の断面図に模式的に矢印で示したように、周期的構造の屈折率の低い部分の微視的構造においても屈折率差による垂直方向の光の閉じ込めがなされる構造となっている。

【0043】第五の実施の形態の作製工程は、第一の実施の形態と同一であり、マスクパターン形状が異なるの

みである。この試料では、波長1.5μmの電界の振動方向が基板71面内に垂直である垂直偏光は、2次元の周期構造を有する空孔以外の部分73と空孔を充填した部分74を透過し、電界の振動方向が基板71面内に水平である水平偏光は、フォトニックバンドギャップのため2次元の周期構造を有する空孔以外の部分73と空孔を充填した部分74を透過しない。

【0044】本試料では、周期構造の一部に空孔が1列抜けた直線状の欠陥導波路76が形成されている。欠陥導波路76に入射された水平偏光の波長1.5μmの光は、水平方向に関しては充填された空孔の周期構造がフォトニックバンドギャップとなっているため周期的構造を有する空孔以外の部分73と空孔を充填した部分74に光が侵入することができず反射されることにより欠陥導波路76部分に閉じ込められ、垂直方向に関しては上下の屈折率差により欠陥導波路76部分に閉じ込められて、欠陥導波路76を伝搬する。

【0045】しかしながら、伝搬する光は完全に欠陥導波路76内のみ伝搬するのではなく、厳密には光の若干部分が欠陥導波路外側ににじみだした状態で伝搬する。このため、欠陥導波路外側の周期構造を有する空孔以外の部分73と空孔を充填した部分74の伝搬において垂直方向への散乱損失が大きければ、欠陥導波路を伝搬する光の伝搬損失も大きくなる。本実施の形態で、水平偏光に対する欠陥導波路76の透過損失を測定したところ2dB/mmとなり、従来構造に比べて、1mmあたりで15dB以上の極めて大きな損失改善が得られ、本発明の効果が極めて大きいことが示された。本実施の形態の試料は、センチメートル（cm）オーダーでの光の伝搬を十分に行うことができる導波路媒質である。

【0046】[第六の実施の形態] 次に、2次元周期構造の一部に欠陥を導入し、その欠陥部分に光を導波させる場合で、欠陥部分が曲り導波路である実施の形態について説明する。本発明の第六の実施の形態の構造を模式的に図8に示す（上面図（上部クラッド層85の一部は除去）およびそのF-F'、G-G'線断面図）。第六の実施の形態は、第五の実施の形態において、直線状の欠陥導波路であったものが、角度60度まげの曲り欠陥導波路となっている。基板81上に下部クラッド層82が形成され、さらにその上に周期的に形成された空孔以外の部分83と周期的に形成された空孔を充填した部分84が形成され、さらにその上に上部クラッド層85が形成された構造となっており、さらに上面図に示すように曲り欠陥導波路86が形成されている。

【0047】第六の実施の形態では、第一の実施の形態と同様、基板81はSiであり、下部クラッド層82はSiO<sub>2</sub>層（屈折率約1.5、厚さ3μm）であり、周期的に形成された空孔以外の部分83はSi（屈折率約3.5、厚さ0.2μm）であり、周期的に形成された空孔を充填した部分84はエポキシ系ポリマー（屈折率

1. 6、厚さ0.2  $\mu\text{m}$ )であり、上部クラッド層85はフッ素化エポキシ系ポリマー(屈折率1.5、厚さ3  $\mu\text{m}$ )である。また、欠陥導波路86は周期的に形成された空孔以外の部分83と同じSiである。また、空孔を充填した部分84の直径が0.3  $\mu\text{m}$ 、3角格子を形成し充填された周期的空孔の周期が0.4  $\mu\text{m}$ となっている。

【0048】本構造においては、周期的に形成された空孔以外の部分83のSiが、周期的構造における屈折率の高い部分になっており、周期的に形成された空孔を充填した部分84のエポキシ系ポリマーが屈折率の低い部分となっている。その結果、周期的に変化する構造の屈折率の高い部分の屈折率を $n_1$ 、屈折率の低い部分の屈折率を $n_2$ とし、下部クラッド層の屈折率を $n_3$ 、上部クラッド層の屈折率を $n_4$ としたとき、 $n_2 < n_1$ かつ $n_3 < n_1$ かつ $n_4 < n_1$ であり、かつ $n_3 < n_2$ かつ $n_4 < n_2$ の条件を満たしている。このため、図8の断面図に模式的に矢印で示したように、周期的構造の屈折率の低い部分の微視的構造においても屈折率差による垂直方向の光の閉じ込めがなされる構造となっている。

【0049】第六の実施の形態の作製工程は、第一の実施の形態と同一であり、マスクパターン形状が異なるのみである。この試料では、波長1.5  $\mu\text{m}$ の電界の振動方向が基板81面内に垂直である垂直偏光は、2次元の周期構造を有する空孔以外の部分83と空孔を充填した部分84を透過し、電界の振動方向が基板81面内に水平である水平偏光は、フォトリソバンドギャップのため2次元の周期構造を有する空孔以外の部分83と空孔を充填した部分84を透過しない。

【0050】本試料では、周期構造の一部に空孔が1列抜けた曲り欠陥導波路86が形成されている。曲り欠陥導波路76に入射された水平偏光の波長1.5  $\mu\text{m}$ の光は、水平方向に関しては充填された空孔の周期構造がフォトリソバンドギャップとなっているため周期的構造を有する空孔以外の部分83と空孔を充填した部分84に光が侵入することができず反射されることにより曲り欠陥導波路86部分に閉じ込められ、垂直方向に関しては上下の屈折率差により曲り欠陥導波路86部分に閉じ込められて、曲り欠陥導波路86を伝搬する。

【0051】しかしながら、伝搬する光は完全に欠陥導波路86内のみ伝搬するのではなく、厳密には光の若干部分が欠陥導波路外側ににじみだした状態で伝搬する。このため、欠陥導波路外側の周期構造を有する空孔以外の部分83と空孔を充填した部分84の伝搬において垂直方向への散乱損失が大きければ、欠陥導波路を伝搬する光の伝搬損失も大きくなる。従来は欠陥導波路自体の損失値が20 dB/mm以上と大きかったため、曲げ部分の曲げ損失が精確に測定できなかったが、本実施の形態で、水平偏光に対する曲り欠陥導波路86(全長1 m、曲り箇所1箇所)の透過損失を測定したところ、

2. 5 dBとなり、本実施の形態での曲り部分の損失は0.5 dBと見積もることができた。曲り部分においても、曲り導波路外側への光のにじみだしはより大きくなるため、本実施の形態の構造は、曲り損失低減にも効果があると考えられる。本発明の効果により、曲り導波路においても低損失な欠陥導波路が実現できることが示された。

【0052】以上の第一の実施の形態から第六の実施の形態により本発明を説明したが、本発明は上記実施の形態の構造および材料に限定されるものでないことは明らかである。

【0053】

【発明の効果】以上説明したとおり本発明によれば、屈折率 $n_1$ の複数の柱状物を屈折率 $n_2$ の領域中に周期的に配置することで屈折率を周期的に変化させた層を、前記 $n_1$ および前記 $n_2$ よりも屈折率の低い下部クラッド層と、前記 $n_1$ および $n_2$ よりも屈折率の低い上部クラッド層とで挟むことにより、従来垂直方向の光の閉じ込め構造が微視的になされていなかった空孔部あるいは柱状物以外の部分についても、微視的に屈折率差による垂直方向閉じ込め構造を形成している。

【0054】その結果、2次元フォトリソ結晶あるいは2次元フォトリソ結晶欠陥導波路の伝搬損失が大きいという問題点を解決し、低損失2次元フォトリソ結晶および低損失2次元フォトリソ結晶欠陥導波路を実現することができ、種々の光デバイス(例えば光情報処理や光伝送等に用いられるレーザ、光導波路、光集積回路等)への応用が可能となる。

【0055】また、光を導波する層における柱状物または空孔の一部に、周期性の欠陥部分を導入することにより、例えば直線上の欠陥導波路または角度60度の曲り欠陥導波路等を容易に作成することができる。本発明構造では、これら欠陥導波路における曲り損失の低減に効果的である。また、下部クラッド層、上部クラッド層にエポキシ系ポリマーやフッ素化エポキシ系ポリマーを用いることにより、Siよりも低屈折率を容易に実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第一および第二の実施の形態の構造(周期的に空孔を配置)を示す模式図である。

【図2】 本発明の第一の実施の形態(周期的に空孔を配置)の作製工程を示す模式図である。

【図3】 本発明の第二の実施の形態(周期的に空孔を配置)の作製工程を示す模式図である。

【図4】 本発明の第三の実施の形態の構造(周期的に円柱を配置)を示す模式図である。

【図5】 本発明の第四の実施の形態の構造(周期的に空孔を配置、かつ、上部クラッド層および下部クラッド層にも空孔を形成)を示す模式図である。

【図6】 本発明の第四の実施の形態(周期的に空孔を

配置、かつ、上部クラッド層および下部クラッド層にも空孔を形成)の作製工程を示す模式図である。

【図7】 本発明の第五の実施の形態の構造(直線状の欠陥)を示す模式図である。

【図8】 本発明の第六の実施の形態の構造(角度60度の曲り欠陥)を示す模式図である。

【図9】 従来の2次元フォトニック結晶の一構造(周期的に空孔を配置)を示す模式図である。

【図10】 従来の2次元フォトニック結晶の一構造(周期的に円柱を配置)を示す模式図である。

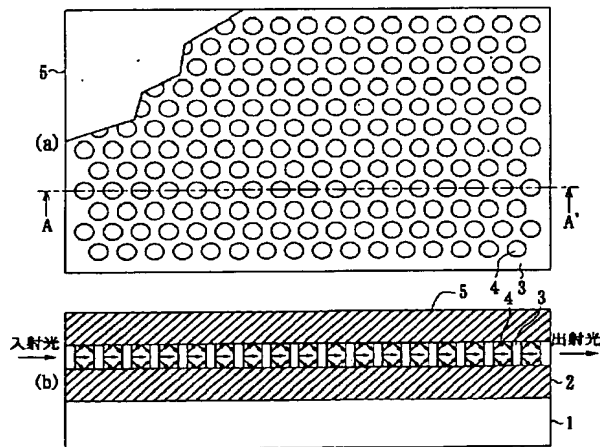
【図11】 従来の2次元フォトニック結晶の一構造(周期的に空孔を配置、かつ、上部クラッド層および下部クラッド層にも空孔を形成)を示す模式図である。

【図12】 従来の2次元フォトニック結晶欠陥導波路の一構造(直線状欠陥)を示す模式図である。

【符号の説明】

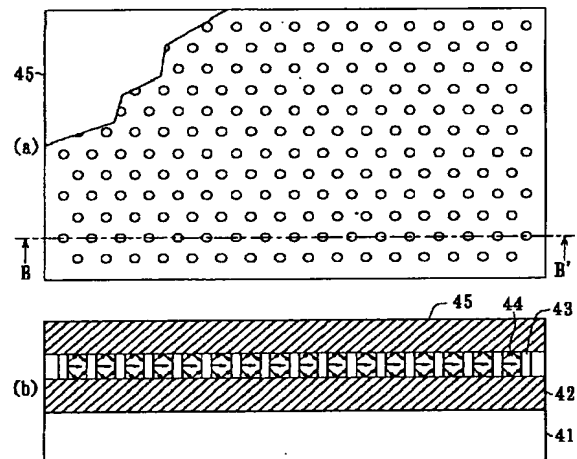
1…基板、2…下部クラッド層、3…周期的に形成された空孔以外の部分、4…周期的に形成された空孔を充填した部分、5…上部クラッド層、21…Si層、22…SiO<sub>2</sub>層、23…トップSi層、24…Niマスク、25…空孔の残存部分のSi、26…空孔を埋め込んだエポキシ系ポリマー層、27…空孔を充填したエポキシ系ポリマー、28…上部クラッド層となるフッ素化エポキシ系ポリマー層、31…Si層、32…SiO<sub>2</sub>層、33…トップSi層、34…Niマスク、35…空孔の残存部分のSi、36…空孔を埋め込んだGe添加SiO<sub>2</sub>層、37…空孔を充填したGe添加SiO<sub>2</sub>層、3\*

【図1】



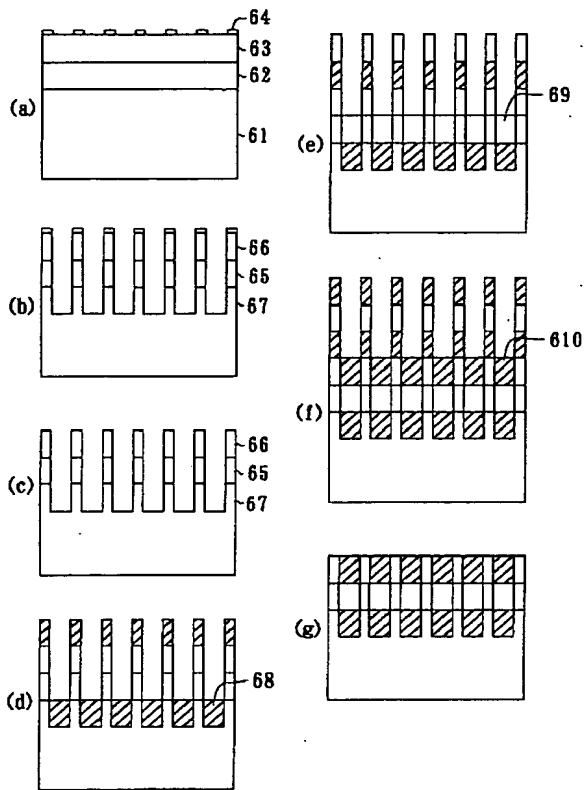
\* 8…上部クラッド層となるSiO<sub>2</sub>層、41…基板、42…下部クラッド層、43…周期的に形成された空孔以外の部分、44…周期的に形成された空孔を充填した部分、45…上部クラッド層、51…基板、52…第一のコア層、53…第一の上部クラッド層、54…第一の下部クラッド層、55…第二のコア層、56…第二の上部クラッド層、57…第二の下部クラッド層、61…AlGaAs層、62…GaAs層、63…トップAlGaAs層、64…Niマスク、65…第一のコア層、66…第一の上部クラッド層、67…第一の下部クラッド層、68…第二の下部クラッド層、69…第二のコア層、610…第二の上部クラッド層、71…基板、72…下部クラッド層、73…周期的に形成された空孔以外の部分、74…周期的に形成された空孔を充填した部分、75…上部クラッド層、76…直線欠陥導波路、81…基板、82…下部クラッド層、83…周期的に形成された空孔以外の部分、84…周期的に形成された空孔を充填した部分、85…上部クラッド層、86…曲り欠陥導波路、91…基板Si、92…SiO<sub>2</sub>層、93…上部Si層、94…空孔、101…基板Si、102…SiO<sub>2</sub>層、103…円柱、111…空孔、112…2次元の周期構造を有するGaAs層、113…2次元の周期構造を有する上部AlGaAs層、114…2次元の周期構造を有する下部AlGaAs層、121…基板Si、122…SiO<sub>2</sub>層、123…上部Si層、124…空孔。

【図4】

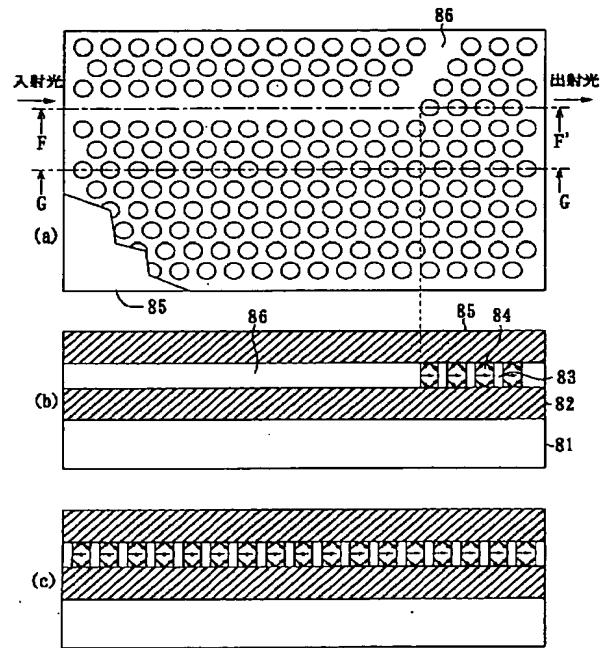




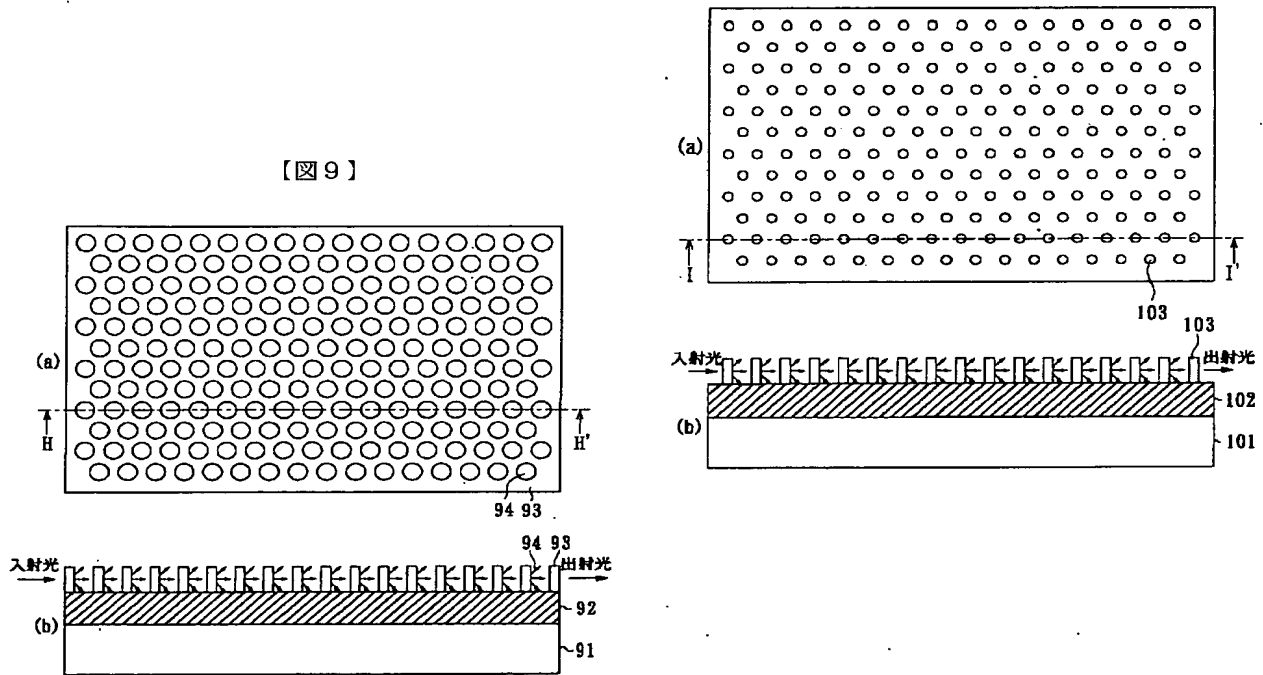
【図6】



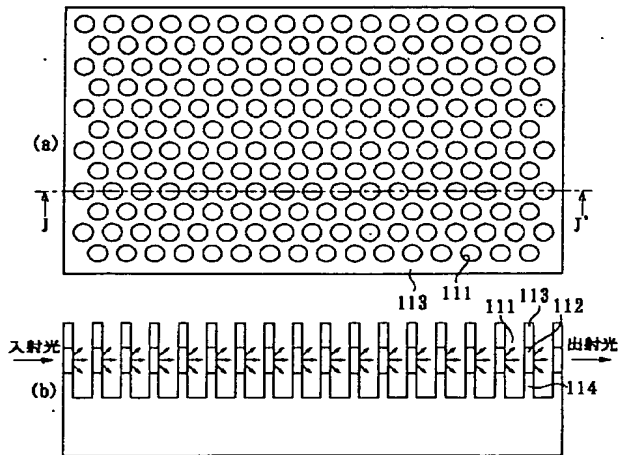
【図8】



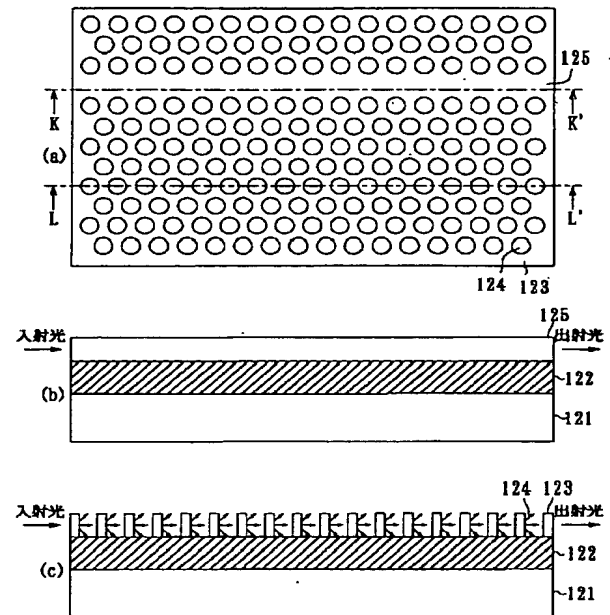
【図10】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(72)発明者 新家 昭彦  
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
本電信電話株式会社内  
(72)発明者 玉村 敏昭  
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
本電信電話株式会社内

(72)発明者 都丸 暁  
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
本電信電話株式会社内  
(72)発明者 高橋 千春  
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
本電信電話株式会社内  
(72)発明者 杉田 彰夫  
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
本電信電話株式会社内

Fターム(参考) 2H047 KA04 KA11 QA05 QA07